УДК 621.039.51;541.126

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ В РЕЖИМЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ГОРЕНИЯ, В ТЕХНИКЕ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ: РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ

В.И. Бойко, Д.Г. Демянюк, О.Ю. Долматов, Д.С. Исаченко, И.В. Шаманин

Томский политехнический университет
E-mail: demyanuk@phtd.tpu.ru

Проведено расчетное исследование свойств материалов на основе борида вольфрама, карбида бора и их послойных комбинаций, обеспечивающих защиту от потоков быстрых нейтронов и заряженных частиц. Установлен факт значительного влияния структуры материала, в частности – пористости, на защитные от потоков заряженных частиц и γ-квантов свойства. При определенных сочетаниях концентрации пор и их характерных размеров эффективность защиты возрастает.

Методика и результаты численных экспериментов

Для численного моделирования процесса прохождения (ослабления) потока быстрых нейтронов в защитных материалах, полученных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), на основе карбида бора и борида вольфрама использована методика, изложенная в монографии [1], применительно к нейтронам [2].

Методика тестировалась путем сопоставления экспериментально определенных и расчетных спектров быстрых нейтронов за эталонной графитовой защитой. Экспериментальные спектры были получены на сцинтилляционном спектрометре с водородосодержащим датчиком на исследовательском водо-водяном реакторе.

Спектры нейтронов перед графитовой защитой в ходе тестовых проверок в расчётах задавались в соответствии с экспериментальными данными. На рис. 1 приведены экспериментальные и расчётные спектры нейтронов $dN(E)/dE$. В ходе тестовых проверок

получено удовлетворительное соответствие между расчётными и экспериментальными данными, что подтверждает высокое качество константного обеспечения и верифицирует расчетную методику.

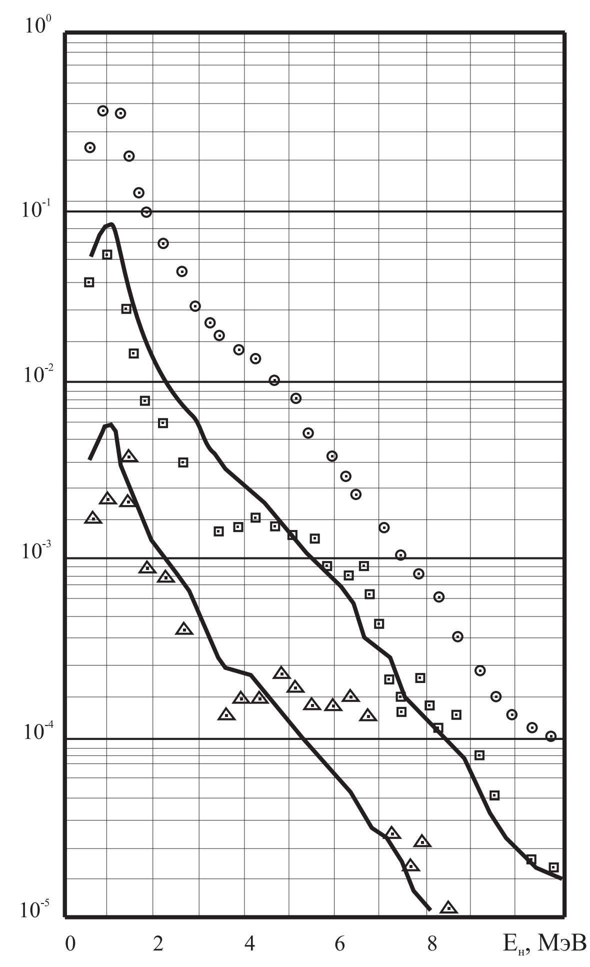


Рис. 1. *Экспериментальный спектр: ○ – перед графитовой защитой; □ – за графитовой защитой массовой толщиной 37,5, Δ – 75 г/см². Расчетный спектр – сплошные линии*

В численных экспериментах моделировалось прохождение потока быстрых нейтронов, плотность которого составляет 10^{14} нейтрон/(см²·с), через защитные экраны, выполненные из различных материалов. Варьировалась толщина экранов. Рассмотрены двухслойные экраны графит-металлокерамика, в которых графитовый слой «смещает» спектр нейтронов в область меньших энергий и, таким образом, повышает эффективность вольфрам-борсодержащей защиты.

Плотность металлокерамического вольфрам-борсодержащего материала в расчетах задавалась равной 5,7 г/см³, что соответствует полученным в экспериментах по СВС плотностям материала функциональных элементов. Состав материала на основе W–B:

- вольфрам: ядерная концентрация $1{,}78 \cdot 10^{22}$ см$^{-3}$, массовое содержание в материале 94,3 вес. %;
- изотоп B^{10}: $3{,}52 \cdot 10^{21}$ см$^{-3}$ и 1,14 вес. %, соответственно;
- изотоп B^{11}: $1{,}41 \cdot 10^{22}$ см$^{-3}$ и 4,56 вес. %, соответственно.

На рис. 2 приведены результаты проведённых численных экспериментов. Сплошной линией отмечено энергетическое распределение потока нейтронов за защитой, пунктирной – перед защитой: высокоэнергетическая часть спектра мгновенных нейтронов деления (спектр Уатта). Максимум спектра за защитой смещается в область меньших энергий, интегральный поток значительно снижается.

Численное моделирование процесса прохождения потока быстрых нейтронов через рассмотренные защитные материалы подтвердило выводы, полученные в ходе экспериментального изучения данного вопроса, а именно:

- использование вольфрам-борсодержащих материалов обеспечивает выигрыш защиты по массогабаритным показателям;
- эффективность защиты от потока быстрых нейтронов возрастает при использовании двухслойной защиты: графит-металлокерамика.

Как один из сопутствующих, или самостоятельный, можно рассматривать возникающий при взаимодействии нейтронов с веществом рассеянный или коллимированный поток заряженных частиц.

Эти частицы, взаимодействуя с веществом, образуют в его объеме локальные области аномально большого тепловыделения. Чем меньше область локализации потока частиц в объеме вещества и четче ее геометрические границы, тем более мощному ударно-тепловому воздействию вещество подвергается.

Этому можно воспрепятствовать, обеспечив такие свойства материалов, которые увеличивали бы размеры области локализации потока частиц и сглаживали образующиеся в объеме материалов поля энерговыделения.

Для сплошной однородной среды область локализации в ней импульсного пучка заряженных частиц или γ-квантов определяется, в первую очередь, его параметрами: энергией частиц, диаметром пучка или профилем распределения тока по его сечению [1].

Для пористых металлокерамических материалов важную роль играют их реологические свойства. На процесс термализации частиц существенное влияние оказывает процесс их многократного взаимодействия с поверхностями пор. При этом имеет место изменение траектории частицы за счет рассеяния, в том числе на большие углы. В результате поле энерговыделения пучка заряженных частиц в пористых материалах «размывается», а проективный пробег отдельных частиц существенно уменьшается.

В рамках метода статистических испытаний (метод Монте-Карло) воспроизведена картина проникновения потока протонов в пористый металлокерамический материал. Схема расчетной траектории частиц приведена на рис. 3. Методика численного моделирования изложена в монографии [1]. На рис. 4 показана топограмма распределения поглощенной энергии в металлокерамическом защитном

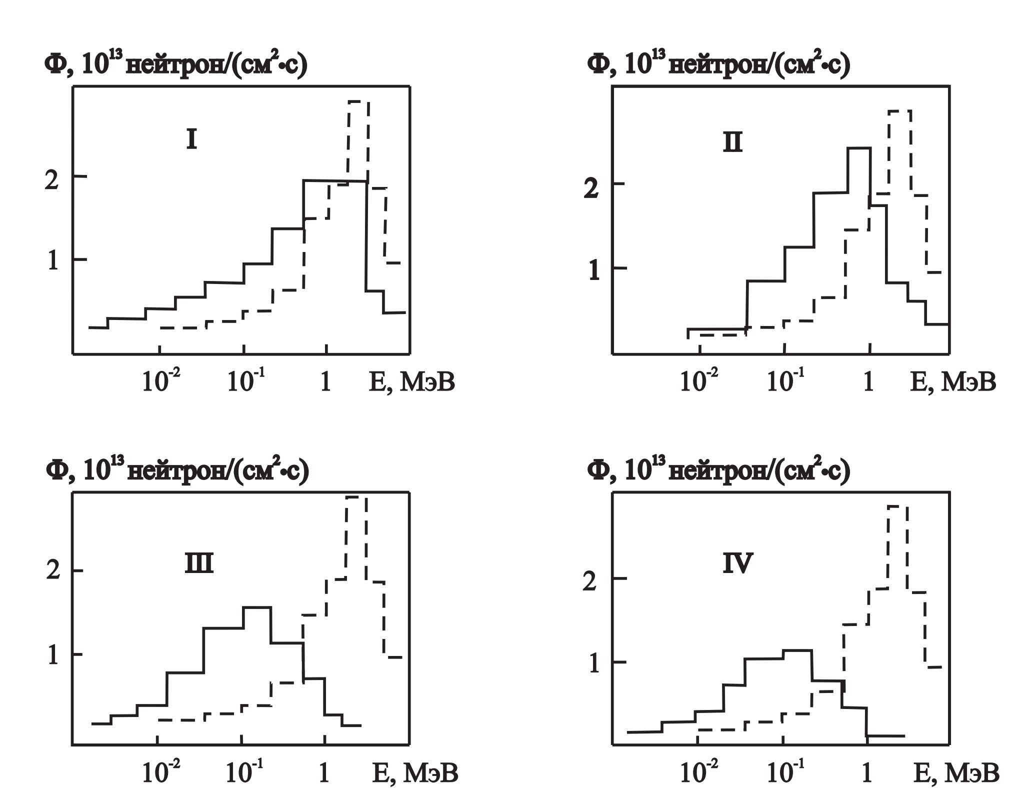


Рис. 2. *Энергетическое распределение плотности потока нейтронов Ф перед защитой (пунктир) и за ней (сплошная линия) для различных вариантов: I) графитовая защита (толщина 30 см); II) металлокерамический защитный экран (8 см); III) металлокерамическая защита (30 см); IV) двухслойный экран, состоящий из слоя графита (15 см) и слоя металлокерамики (15 см)*

материале на базе борида вольфрама для случая воздействия на него протонов с начальной энергией E_0=30 МэВ. Концентрация пор диаметром 0,03 мкм в материале составляет 10^{11} см$^{-3}$. Угол падения протонов случайным образом распределен в интервале [0, $\pi/18$], статистика – 10^5 частиц, геометрия расчета – цилиндрическая (Z0R).

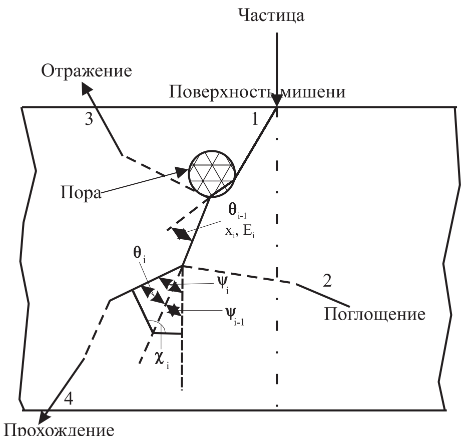


Рис. 3. *Схема траектории: x_i, E_i – свободный пробег и энергия частицы на i-ом отрезке траектории; θ; , ψ_i, χ_i – углы, определяющие сферический угол рассеяния; 1) вход частицы; ветви траекторий на: 2) поглощение; 3) обратное рассеяние; 4) прохождение экрана*

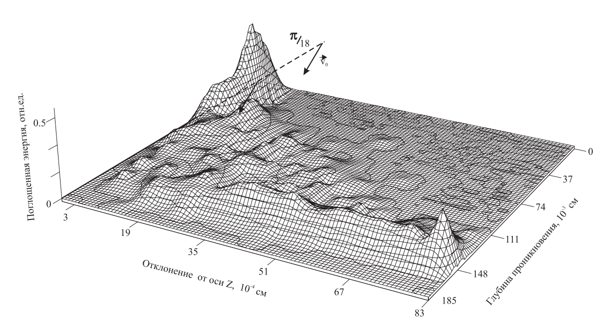


Рис. 4. *Топограмма распределения поглощенной энергии в металлокерамическом защитном материале на базе борида вольфрама*

«Искривление» траектории в процессе прохождения быстрых тяжелых частиц из-за многократного рассеяния на свободных поверхностях пор приводит к нарушению моноэнергетичности потока, даже если не учитывать многократное упругое рассеяние и флуктуацию энергетических потерь. Естественно, что нарушение моноэнергетичности потока приводит к разбросу частиц по глубине их проникновения в вещество. Если без учета «искривления» траектории все частицы термализуются на глубине R_0, то учет влияния пористости приводит к тому, что те частицы, которые испытали рассеяние на свободных поверхностях пор, бу-

дут иметь более «искривленную» траекторию. Хотя полная длина этой траектории будет равна R_0, остановка таких частиц произойдет в области, размеры которой значительно больше по сравнению с беспористым случаем. Понятие «проективный пробег» при взаимодействии заряженных частиц с пористым материалом теряет физический смысл.

Отличия от случая беспористого материала очевидны. Первое из них – отсутствие брегговского пика в конце траектории протонов и «размытость» результирующего поля энерговыделения.

Для электронов последовательность вычислений остается прежней. Изменяется только функциональная зависимость вероятности отражения частиц от свободной поверхности поры от отношения углов отражения и падения. Для протонов использовалась «функция отражения», полученная О.Б. Фирсовым [3, 4]. Тенденция «размытия» результирующего поля энерговыделения в случае воздействия потока электронов становится еще отчетливее.

Расчёт дифференциальных и интегральных характеристик поля электромагнитного излучения за плоскими защитными экранами проводился на основе таковых для поля термализующихся в пористом вольфрам-борсодержащем материале электронов с использованием верифицированного пакета программ [1]. Анализ этих результатов свидетельствует о существенной деформации диаграммы направленности вторичного излучения в сторону, параллельную плоскости размещения экрана.

Таким образом, кроме увеличения эффективности защиты от первичного потока электронов, пористость СВС-материалов обеспечивает защиту от генерируемых при взаимодействии электронов с веществом γ-квантов.

Заключение

Анализ результатов численных экспериментов по изучению защитных от ионизирующих излучений свойств композиционных материалов, полученных в режиме технологического горения, позволяет сформулировать следующие выводы:

- подтверждены выводы по результатам приборного эксперимента относительно преимуществ вольфрам-борсодержащих материалов и двухслойных защитных экранов графит-металлокерамика;
- пористость СВС-материалов, определяемая условиями синтеза, обеспечивает увеличение эффективности защитных конструкций как от первичного потока заряженных частиц, так и от генерируемых ими потоков γ-квантов: поле энерговыделения пучков заряженных частиц в СВС-материалах «размывается», что снижает термоударные нагрузки; понятие «проективный пробег» при взаимодействии заряженных частиц с пористым материалом теряет физический смысл; диаграмма направленности вторичного излучения значительно деформируется в направлении, параллельном поверхности защитного экрана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойко В.И., Скворцов В.А., Фортов В.Е., Шаманин И.В. Взаимодействие импульсных пучков заряженных частиц с веществом. – М.: Физматлит, 2003. – 288 с.
2. Ершов Ю.И., Шихов С.Б. Математические основы теории переноса. Т. 1. Основы теории. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 232 с.
3. Фирсов О.Б. Отражение быстрых ионов от плотной среды под скользящими углами // Доклады АН СССР. – 1966. – Т. 169. – № 6. – С. 1311–1313.
4. Калашников Н.П., Ремизович В.С., Рязанов М.И. Столкновения быстрых заряженных частиц в твердых телах. – М.: Атомиздат, 1980. – 272 с.

УДК 66.023.2